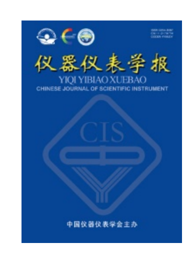


仪器仪表学报
Chinese Journal of Scientific Instrument
ISSN 0254-3087,CN 11-2179/TH

《仪器仪表学报》网络首发论文

题目： 考虑冲洗液机器人骨铣削温度建模及敏感性分析
作者： 周紫琪，柯玮翔，胡钧飞，赵志辉，代煜
DOI： 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413123
收稿日期： 2024-08-02
网络首发日期： 2024-12-06
引用格式： 周紫琪，柯玮翔，胡钧飞，赵志辉，代煜．考虑冲洗液机器人骨铣削温度建模及敏感性分析[J/OL]．仪器仪表学报.
https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2413123





网络首发时间：2024-12-06 09:08:51　　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2179.TH.20241205.1617.026

考虑冲洗液机器人骨铣削温度建模及敏感性分析*

周紫琪[1], 柯玮翔[1], 胡钧飞[1], 赵志辉[2], 代 煜[1]

（1. 南开大学机器人与信息系统化研究所 天津 300350；2. 天津医科大学附属第四中心医院 天津 300070）

摘　要：在机器人辅助骨铣削手术中，大量热量的产生容易导致热坏死，通常通过使用冲洗液来降低铣削温度。然而，传统的骨铣削温度研究并未考虑冲洗液的影响。为此，本研究建立了一个综合考虑冲洗液作用的骨铣削温度模型。首先，基于有限元法，构建了球头铣刀铣削皮质骨的温度场模型。然后，通过点热源温度场理论，标定了不同流速下冲洗液的对流换热系数。结果表明，当冲洗液流速分别为31.6 μm³/s、43.3 μm³/s和65 μm³/s时，对流换热系数分别为400 W/（m²·℃）、800 W（/m²·℃）和1100 W/（m²·℃）。最后，采用响应面法分析了各铣削参数对最高铣削温度的影响。分析结果表明，铣削深度对最高温度的影响最大，其次是冲洗液流速、进给速度和铣削角度。该温度模型及分析结果为术前铣削参数选择提供了有价值的参考，有助于减少骨铣削过程中的热坏死风险。

关键词：骨铣削温度；有限元法；热参数识别；响应面法

中图分类号：TH811　TH781　**文献标识码**：A　**国家标准学科分类代码**：510.1040

Temperature modeling and sensitivity analysis of robot-assisted bone milling considering irrigation fluid

Zhou Ziqi[1], Ke Weixiang[1], Hu Junfei[1], Zhao Zhihui[2], Dai Yu[1]

(1. Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Affiliated Fourth Central Hospital, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China)

Abstract: In robot-assisted bone milling surgery, the generation of a large amount of heat can easily lead to thermal necrosis. The irrigation fluid is commonly used to reduce the milling temperature. However, traditional research on bone milling temperature does not consider the influence of irrigation fluid. To address this, this study proposes a bone milling temperature model that comprehensively considers the effect of irrigation fluid. First, based on the finite element method, a temperature field model of cortical bone milling with a ball-end milling cutter is formulated. Then, the convective heat transfer coefficient of the irrigation fluid at different flow rates is calibrated using the point heat source temperature field theory. The results indicate that, at flow rates of 31.6 μm³/s, 43.3 μm³/s, and 65 μm³/s, the convective heat transfer coefficients are 400 W/(m²·℃), 800 W/(m²·℃), and 1100 W/(m²·℃), respectively. Finally, response surface methodology is utilized to analyze the effects of various milling parameters on the maximum milling temperature. The analysis shows that milling depth has the most significant impact on the maximum temperature, followed by irrigation fluid flow rate, feed speed, and milling angle. This temperature model and the accompanying analysis provide valuable references for selecting preoperative milling parameters and help reduce the risk of thermal necrosis during bone milling.

Keywords: bone milling temperature; finite element method; thermal parameter identification; response surface method

0 引　言

近年来，医疗机器人辅助技术因其定位精度高、稳定性强、能减少大量人工操作等优点被引入到骨科手术中[1]。机器人辅助骨铣削技术是最常见的一种手术操作。随着该技术的广泛应用，在骨铣削过程中产生的安全问题也逐渐引起了人们的重视[2]。骨具有低热导率和高比热的特性[3]。骨铣削过程中产生的大量热量容易堆积在局部导致铣削温度过高。过高的铣削温度会

收稿日期：2024-08-02　　Received Date: 2024-08-02

* 基金项目：国家自然科学基金（62173190）项目、天津市科技计划（21JCYBJC00280）项目资助

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

使刀刃软化，降低骨表面的铣削质量。持续高温甚至会导致骨细胞和组织发生热坏死。因此避免温度过高对手术成功与否有着至关重要的影响。在机器人手术系统中通常会使用各种传感器设备来监测手术状态从而保证患者的安全[4-6]。而骨铣削操作的手术区域狭小，使用传感器会影响医生的手术视野。肌肉组织的出血状况以及骨切屑的产生还会影响传感器的数据采集。因此目前还没有合适的传感器能够监测手术中的铣削温度[7]，医生只能依靠个人经验来估计温度。例如通过观察肌肉组织的外观或铣削时产生的烟雾来判断温度是否过高。当温度被视为过高时，将暂停铣削操作，使用冲洗液给铣削区域降温，然后用吸入器抽出残余的冲洗液。因此，通过预测铣削过程中骨的温度变化来避免温度过高成为了研究的关键。

在骨铣削温度的研究上，研究者最早是以理论分析的方法来建立温度模型。Shin等[8]和Sugita等[9]分别根据运动平面热源理论和运动线性热源理论，建立了骨材料的温度分布模型。然而他们都没有提供骨铣削过程中热量的具体计算方法，只能得到铣削区域的平均温度。直到Liao等[10]结合骨材料应力模型和运动线性热源理论，建立了骨铣削温度的数学模型。他们认为铣削过程中剪切效应和犁耕效应产生的部分热量直接流入骨材料，这为骨铣削温度的数学建模提供了可解释性和理论支持。相比于用形状规则、能量恒定的简化热源代替真实热源，Li等[7]基于热产生和热传导理论计算了骨与球头铣刀之间的摩擦热量，建立了骨的三维温度模型。然而在机理分析的基础上建立数学模型，往往会受到边界条件的限制[11, 12]。例如无法考虑铣刀铣削角度的变化以及冲洗液对温度的影响等。因此，部分研究者选择基于大量的实验数据来研究骨铣削温度。Tian等[13]对不同骨层进行了一系列不同铣削条件下的骨铣削实验，并利用响应面法和Sobol法定量分析了各铣削参数对温度的影响。结果表明在一定范围内，铣刀进给速度和主轴转速的提高对温度升高有显著影响。Al-Abdullah等[2]设计了全因子实验来收集数据，利用人工神经网络来估计不同骨密度下的铣削力以及铣削温度与铣刀进给速度和主轴转速的关系。利用神经网络建模需要大量骨铣削实验的温度数据。目前的温度采集设备主要分为接触式传感器和非接触式传感器。接触式的传感器例如热电偶，优点是精度高、延迟小，缺点是采集数据的效率低、使用不便[14]。非接触式的传感器例如热像仪，优点是采集数据的效率高、使用便利，缺点是延迟大、容易受环境影响，比如冲洗液的使用。传统的骨铣削实验需要耗费大量的时间来制备实验样本和采集温度数据、受到实验环境和传感器设备的限制且不便于铣削条件的控制。而有限元法不仅能够精确的控制仿真环境和铣削条件，还能获得丰富且全面的数据[15]。Tai等[16]根据热能转换方程，由电机电功率确定发热量，然后基于有限元法来估计颅骨磨削手术中骨表面的温度。Zhang等[17]利用反向传热法来定义颅骨磨削手术中的热源，并基于有限元法模拟颅骨磨削过程中的温度分布以获得最佳的铣削参数。以上基于有限元法建立的温度模型利用了等效热源代替真实热源来预测不同铣削参数下的温度场。然而他们都是基于干铣条件下建立的模型，没有考虑冲洗液对铣削温度的影响，无法预测使用冲洗液后的铣削温度。在实际的骨铣削手术中，使用冲洗液是必不可少的操作。冲洗液能够有效地降低铣削温度，减少骨细胞和组织热坏死的发生，同时减少铣刀的热变形，保持刀具硬度从而保证骨表面的铣削质量。因此冲洗液是影响骨铣削温度的重要因素。考虑冲洗液影响的骨铣削温度模型更符合实际手术场景，能够为医生提供更加有效且全面的参考。

本研究基于有限元法建立了球头铣刀铣削皮质骨的温度模型。该模型计算了铣削过程中的真实热源，不仅适用于各种铣削条件，还考虑了不同流速下的冲洗液对铣削温度的影响。基于点热源温度场理论，通过点热源实验和有限元仿真计算标定了不同流速下冲洗液的对流换热系数。最后基于响应面法设计了仿真实验。利用获得的仿真结果，建立了最高铣削温度的经验数学模型。对各铣削参数进行了敏感性分析，讨论了铣削角度、铣削深度、进给速度以及冲洗液流速对最高铣削温度的影响。该模型以及分析结果有望能够为医生在术前规划中选择铣削参数提供参考。

1　基于ABAQUS的骨铣削温度场建模

1.1　模型假设

为了便于研究加入冲洗液后的骨铣削过程，提出了以下假设。如图1所示，铣削参数包括主轴转速n、

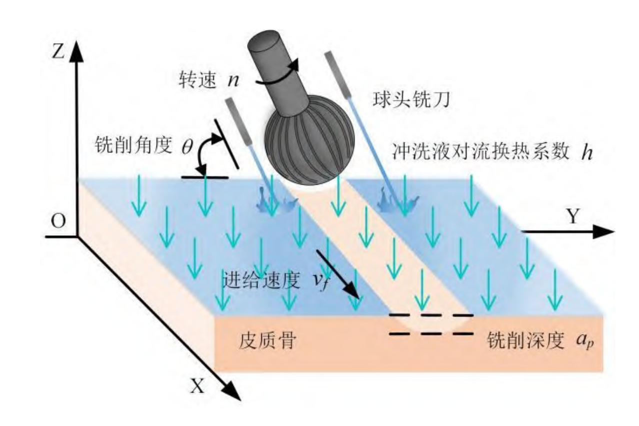


图1　使用冲洗液的骨铣削过程

Fig.1　Bone milling process using irrigation fluid

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

铣削角度θ、进给速度v_f、铣削深度a_p在铣削过程中保持不变。目标骨为一形状规则且无限大的板。由于皮质骨的热学特性在不同方向上的变化较小[18]，因此将目标骨视为具有各向同性和均一性的骨材料。由于铣刀的硬度远大于骨的硬度，因此忽略铣刀接触骨时的微小变形。对流换热系数h表征了流体与固体表面之间的换热能力。在骨铣削过程中，冲洗液流过骨表面时由于冲洗液与骨面之间的对流换热作用能够带走骨上大部分的铣削热，从而达到对骨降温冷却的效果。对流换热系数h的大小反映了对流换热作用的强弱。因此在骨铣削温度模型中，在骨面上引入一个对流换热系数h来表征冲洗液与骨面之间的对流换热作用。

1.2 几何模型的建立以及材料属性设置

球头铣刀的几何适应性强、易控制且铣削精度高、铣削质量好，常作为进行骨铣削的刀具。以球心为原点，建立柱坐标系(o-rθz)，与球面相切的圆柱面上螺旋线上的点(r_c, θ_c, z_c)可以表示为：

$$r_c = R_0 \tag{1}$$

$$\theta_c = \frac{z_c + R_0}{R_0 \tan \beta_0} + \varphi_j \tag{2}$$

$$\varphi_j = (j-1)\frac{2\pi}{N_f} + \varphi_1 \tag{3}$$

式中：R_0为球体半径；β_0为螺旋角；φ_j为第j个叶片的起始角；φ_1为第一个叶片的起始角；N_f为总叶片数。

将螺旋线沿圆柱半径投影到球面上，则球面上螺旋线上的点(r_h, θ_h, z_h)可以表示为：

$$r_h = \sqrt{R_0^2 - z_h^2} \tag{4}$$

$$\theta_h = \frac{z_h + R_0}{R_0 \tan \beta_0} + \varphi_j \tag{5}$$

由于球头铣刀的刀刃具有复杂的螺旋形结构，利用Solidworks对球头铣刀进行几何建模之后再导入到ABAQUS中。参考医用球头铣刀，本研究中球头铣刀建模时的几何参数如表1所示。骨工件的几何模型为一厚度是2 mm的矩形块。

表 1 球头铣刀的几何参数

Table 1 Geometric parameters of ball-end milling cutter

刀头直径（mm）	刃数	切削刃长度（mm）	螺旋角（°）
4	10	3.8	30

骨材料可分为皮质骨和松质骨。皮质骨位于骨头的外部，而松质骨主要位于颅骨、脊椎动物骨骼和长骨的末端。人类骨骼的80%左右是皮质骨组织，剩下的20%是松质骨组织。皮质骨比松质骨更硬，因此铣削皮质骨时会出现更高的铣削温度和铣削力。对骨细胞、神经以及肌肉组织造成机械伤害和热损伤的可能性更大。因此本文建立的骨铣削温度模型选择将皮质骨作为骨工件的材料，球头铣刀的材料为YG8硬质合金，其材料参数如表2所示。

表 2 模型的材料参数

Table 2 Material property parameters of model

部件	密度（kg·m^{-3}）	杨氏模量（MPa）	泊松比	热导率（W·m^{-1}·℃$^{-1}$）	比热容（J·kg^{-1}·℃$^{-1}$）
骨工件	1640	1.67×10^4	0.3	0.05	100
球头铣刀	14600	6.4×10^5	0.22	79.6	220

皮质骨在铣削过程中会发生高应变率的变形，采用Johnson-Cook本构模型来模拟骨材料的应力流动有：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})\left[1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m\right] \tag{6}$$

式中：ε为等效塑性应变；$\dot{\varepsilon}$和$\dot{\varepsilon}_0$为等效塑性应变率和参考塑性应变率；T为工件铣削部位的温度；T_m为铣削材料的熔点；T_r为环境温度；n为应变硬化指数；m为热软化指数；A、B、C为材料的屈服强度、应变、应变敏感率。皮质骨的Johnson-Cook模型参数如表3所示。

表 3 皮质骨的 Johnson-Cook 模型参数

Table 3 Johnson-Cook model parameters of cortical bone

屈服强度（MPa）	应变（MPa）	应变敏感率	应变硬化指数	热软化指数	熔点（℃）	参考塑性应变率（s^{-1}）
50	101	0.03	0.08	1.03	875	0.001

1.3 网格划分以及相互作用设置

网格的划分对模型的仿真效果、精度以及计算时间有重要影响。当网格划分精度低时，虽然计算耗时会降低，但是仿真效果和计算结果可能会存在较大误差。网格精度划分得越细，计算结果精度也就越高，同时也会占用计算机过大的内存，增加了计算耗时，对计算机配置的要求也会增加。由于骨的导热系数小，比热大，因此在铣削过程中热量通常会堆积在骨上与铣刀接触的铣削区域，热量难以向四周传导。当网格划分的尺寸较大时，原本温度变化较小但是距离铣削区域较近的部分就容易被误判为温度较高。为了更好地反映铣削层的温度变化梯度，同时尽量减少仿真计算时间，选择对铣削层部分进行局部网格加密，其余部分的网格划分较疏。在有限元网格划分中，铣削层

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

的网格尺寸应小于铣削深度的三分之一，以确保仿真结果的准确性。否则，在计算过程中网格易被判定为温度过高失效而被删除脱离骨工件，从而影响仿真效果。铣削深度通常大于0.1 mm，因此铣削层的网格尺寸小于0.03 mm时即可满足网格精度要求，该模型中骨工件上最小的网格尺寸被设为0.01 mm。模型的网格参数设置如表4所示，网格划分效果如图2所示。

表 4 模型的网格属性

Table 4 Meshproperty of the model

部件	单元属性	单元形状	单元类型
骨工件	C3D8RT	六面体	温度-位移耦合
铣刀	C3D4T	四面体	温度-位移耦合

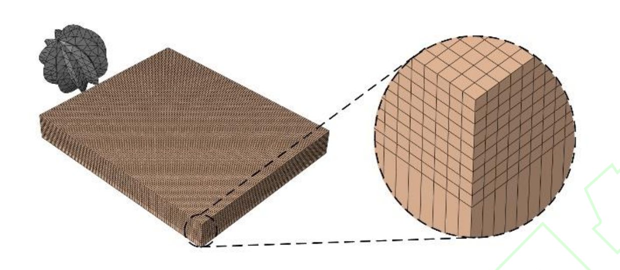


图2　模型的网格划分

Fig.2　Meshing of the model

在边界条件中，约束骨工件X、Y、Z三个方向的六个自由度来固定骨工件，铣刀则需根据铣削角度、铣削深度、转速以及进给速度进行相应的设置。铣刀与骨工件之间的接触类型被设置为表面与表面，利用罚接触公式来计算摩擦力，摩擦系数为0.3[19]。骨铣削手术中通常会加入手术冲洗液来给手术区域降温，因此在骨铣削温度模型中还考虑了冲洗液的使用对骨铣削温度的影响。如图1所示，在有限元模型中为了模拟骨面被紧邻的冲洗液流过后降温冷却的效果，需要在相互作用设置中对骨工件的上表面赋予一个对流换热系数h。而使用冲洗液引起的对流换热作用所对应的对流换热系数h的大小是未知的，需要通过实验来标定。

2　冲洗液对流换热系数的标定

2.1　标定方法

点热源在持续加热一无限大的平板表面时，在t时刻，平板上距离热源r处的温度可表示为[20]：

$$T(r,t)=T_0+\int_0^t\left[\frac{Q_d}{4\pi d\lambda\tau}\exp\left(-\frac{r^2c\rho}{4\lambda\tau}-\frac{2h}{c\rho d}\tau\right)\right]\mathrm{d}\tau \quad (7)$$

式中：T_0是环境温度；Q_d是点热源的能量；d是平板的厚度；ρ、λ、c分别是平板的密度、热导率、比热；h是环境的对流换热系数。当距离r、环境温度T_0、平板的厚度d、平板的密度ρ、热导率λ和比热c已知时，r处的温度T就可以表示为关于点热源能量Q_d和环境对流换热系数h两个参数的时间函数$T(t)$。因此通过确定r处的温度T以及点热源能量Q_d就可以反演出环境的对流换热系数h。为了标定冲洗液的对流换热系数h，设计了一个加入冲洗液的点热源实验，并设计了一个有限元模型来仿真实验过程从而反演出冲洗液的对流换热系数h。如图3所示为冲洗液对流换热系数h的标定流程图，基于Isight工程优化软件来实现标定过程。如表5所示为粒子群优化算法的参数设置。

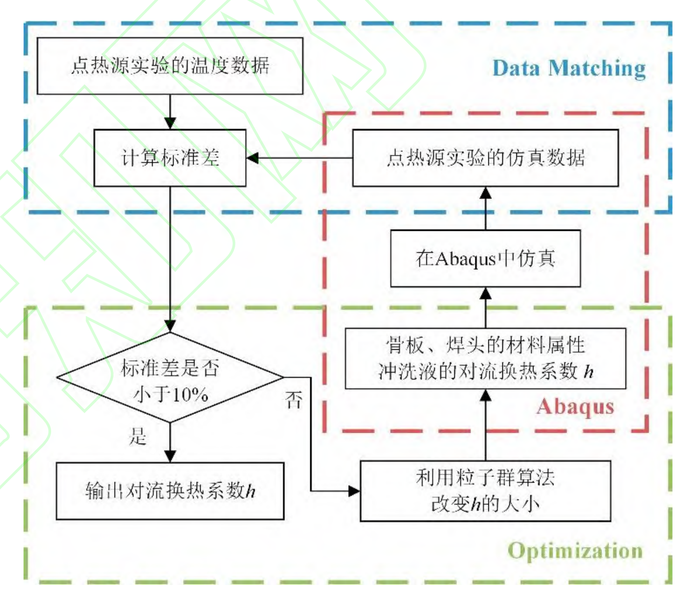


图3　冲洗液对流换热系数的标定流程图

Fig.3　Calibration flowchart for the convective heat transfer coefficient of irrigation fluid

表 5 粒子群算法的参数设置

Table 5 Parameters of the particle swarm algorithm

最大迭代次数	100	全局增量	0.9
粒子数	5	粒子增量	0.9
惯性权重	0.9	最大速度	0.1

标定过程由三个模块组成：Abaqus模块、Data Matching模块、Optimization模块。在Data Matching模块中输入点热源实验中采样点的温度数据。在Abaqus模块中，定义有限元模型中骨工件和焊头部件的材料属性，将冲洗液的对流换热系数h设为参数变量。定义h的初始值，输入到Abaqus模块中进行仿真。每次仿真后，在模型中提取实验中采样点相应位置的仿真数据，传输到Data Matching模块，并在该模块中计算仿真数

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

据与实验数据之间的标准差。然后将标准差的计算结果传输给Optimization模块，优化目标是使标准差小于10%。如果标准差大于10%，则利用粒子群优化算法改变*h*的值，继续在Abaqus中进行仿真。直到仿真数据与实验数据之间的标准差小于10%，则输出*h*的值。

2.2 点热源实验及其有限元模型

骨科手术中使用的冲洗液一般为生理盐水，与水的热学性能基本一致，所以选择用水来进行实验。如图4所示为点热源实验装置。

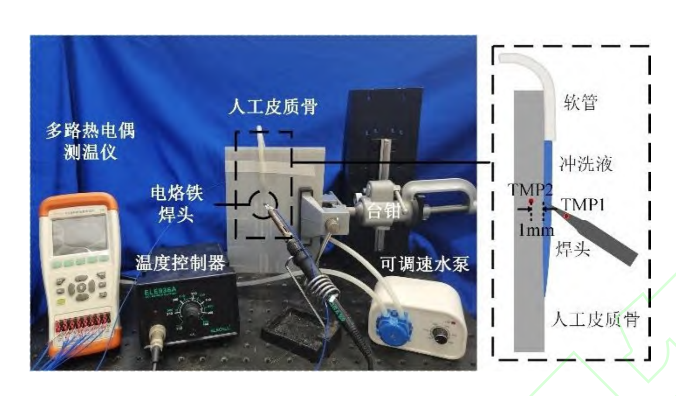


图4　点热源实验装置

Fig.4　Set-up for point heat source experiments

实验采用标准的人工皮质骨材料，骨板来及美国SAMBONES公司，其组成成分为短纤维填充环氧树脂(short fiber filled epoxy，SFFE)，具有较好的材料均匀性和一致性。SFFE材料获得美国材料与试验协会的批准，用作人类皮质骨的替代实验材料[21]。实验的操作如下：皮质骨骨板被台钳固定在实验台上。在温度控制器的作用下，将电烙铁焊头的初始温度调至250℃。电烙铁焊头为尖端形状，在接触骨面上一点时可视为一点热源。在可调速水泵的作用下，水以一定的流速从软管流过骨面以及焊头。通过多路热电偶测温仪来采集温度数据，热电偶的温度测量点位置如图4所示。其中一个温度测量点TMP1位于焊头上来测量热源的温度变化。由于焊头的温度较高，无法使用热熔胶将热电偶固定在焊头上，选择利用锡纸缠绕焊头将热电偶固定在焊头上。另一个温度测量点TMP2位于骨板内部。通过在骨板底面钻孔，再将热电偶插入孔中并用导热硅脂来填充孔内空隙，最后用热熔胶来固定热电偶。骨板内部的采样点与骨面上热源的距离为1 mm。静置一会待焊头的温度升至250℃，热电偶显示TMP1和TMP2的温度为环境温度时开始实验。由于冲洗液在不同流速下的对流换热系数不同，分别将冲洗液的流速调至31.6 μm^3/s、43.3 μm^3/s以及65 μm^3/s进行了三组实验，一共采集了6组温度数据。点热源实验对应的有限元模型设计了骨板和焊头两个部件。骨板的材料参数如表2所示，焊头的材料为铜。将实验中TMP1的温度数据导入给焊头部件，使仿真中焊头部件的温度变化与实验保持一致。根据实验结果设置相应的环境温度，骨板和焊头的初始温度。在约束条件中，将骨板部件的上表面与焊头部件绑定，确保焊头部件与骨面紧密接触来施加点热源。在相互作用设置中，对骨板部件的上表面赋予*h*。根据如图3所示的标定方法，在Data Matching模块中输入实验中TMP2的温度数据。在Abaqus模块中提取TMP2在模型内对应位置的数据来计算标准差。当实验数据与仿真数据之间的标准差小于10%时得到对流换热系数*h*的标定结果。

2.3 结果

点热源实验的结果如图5所示。如图5(a)所示为TMP1的温度变化。在冲洗液的影响下，焊头的温度从250℃逐渐下降。冲洗液的流速越快，带走的热量越多，焊头温度下降得越剧烈。如图5(b)所示为TMP2的温度变化。在焊头的加热下，热源传导到骨板内采样点

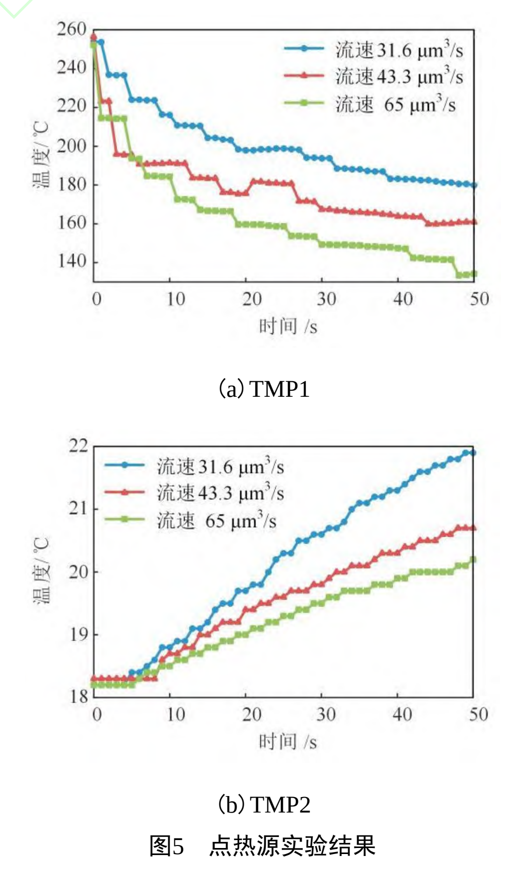
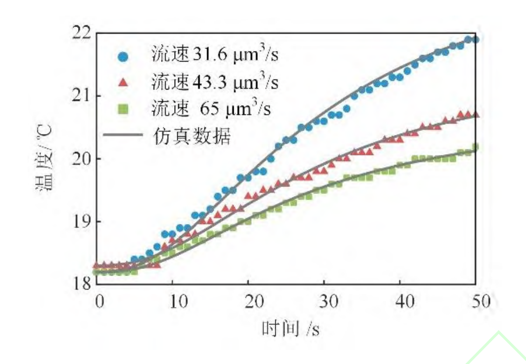


图5　点热源实验结果

Fig.5　Results of point heat source experiments

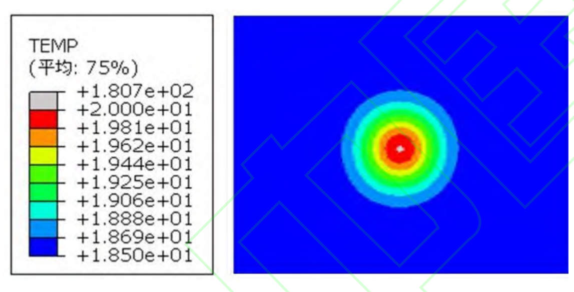
DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

TMP2处的热量大于散失的热量，因此TMP2的温度逐渐升高。冲洗液流速越快，热源的温度越低，TMP2的温度上升得越缓慢。根据如图3所示的标定方法，最后的仿真结果如图6所示。如图6(a)所示，冲洗液流速为31.6 μm³/s、43.3 μm³/s以及65 μm³/s时，标定出其对流换热系数分别为400 W/(m²·℃)、800 W/(m²·℃)、1100 W/(m²·℃)。当对流换热系数为1100 W/(m²·℃)时，加热结束那一刻距离骨面1 mm处横截面的温度云图如图6(b)所示，云图中心即TMP2在仿真中的相应位置。



(a) 实验数据与仿真数据

(a) Experimental and simulation data



(b) 加热结束时的温度云图(h=1100 W/(m²·℃))

(b) Temperature field cloud at the end of heating

图6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

3 基于响应面法的铣削温度影响因素分析

3.1 实验设计

应用Box-Behnken的设计方法进行仿真实验，实验因子设计如表6所示。将铣削角度θ、铣削深度a_p、进给速度v_f、冲洗液流速v_r作为影响因子。在骨铣削温度模型中，提取骨工件上三个采样点Sp1、Sp2、Sp3处的最高温度T_1、T_2、T_3作为响应值。三个采样点在骨铣削温度模型中的相对位置如图7所示，上下分别为俯视图和主视图。一共设计了29组仿真实验，骨工件的初始温度设为26℃，球头铣刀的转速设为30000 r/min，铣削时间为10s，实验方案以及响应值结果如表7所示。

表 6 Box-Behnken 实验因子设计

Table 6 Factor design of Box-Behnken experiment

影响因子	水平		
	-1	0	1
铣削角度（°）	30	45	60
铣削深度（mm）	0.5	0.75	1
进给速度（mm/s）	0.5	0.7	0.9
冲洗液流速（ml/min）	19	26	39

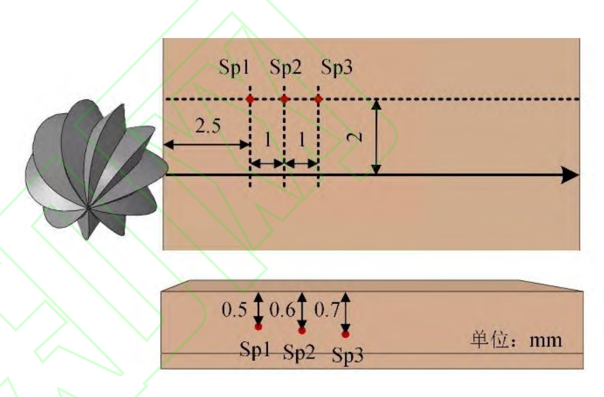


图7 响应值的采样点位置

Fig.7 Location of sample points for response values

表 7 实验设计及结果

Table 7 Experimental design and results

运行序	影响因子 θ (°)	a_p (mm)	v_f (mm/s)	v_r (ml/min)	响应值 T_1 (℃)	T_2 (℃)	T_3 (℃)
1	30	0.75	0.9	26	45.03	47.22	48.88
2	45	0.75	0.5	19	45.27	47.09	37.7
3	60	0.5	0.7	26	33.83	34.63	35.53
4	45	0.75	0.7	26	45.17	45.55	48.15
5	45	0.5	0.7	19	35.56	36.52	36.95
6	30	0.75	0.5	26	43.27	47.2	48.82
7	60	1	0.7	26	61.96	62.04	64.28
8	45	1	0.9	26	58.58	61.76	63.76
9	45	0.75	0.7	26	45.17	45.55	48.15
10	30	0.5	0.7	26	34.29	35.03	36.68
11	60	0.75	0.7	19	47.11	48.6	48.29
12	45	0.75	0.7	26	45.17	45.55	48.15
13	45	0.75	0.7	26	45.17	45.55	48.15
14	45	0.5	0.7	39	34.2	35.17	35.65
15	45	0.5	0.9	26	34.59	35.94	37.03
16	45	1	0.5	26	56.01	62.02	56.18
17	30	1	0.7	26	55.74	60.34	63.68
18	45	0.75	0.9	39	44.42	46.4	47.59
19	45	0.75	0.9	19	46.84	48.62	49.46
20	60	0.75	0.7	39	44.75	46.67	46.29
21	60	0.75	0.9	26	45.86	47.41	48.69

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

22	45	1	0.7	19	60.69	63.53	68.11
23	45	0.5	0.5	26	33.61	34.56	31.61
24	60	0.75	0.5	26	43.56	44.22	34.46
25	45	1	0.7	39	56.83	59.59	64.09
26	45	0.75	0.5	39	42.76	44.65	36.36
27	30	0.75	0.7	39	43.85	45.8	48.45
28	45	0.75	0.7	26	45.17	45.55	48.15
29	30	0.75	0.7	19	46.07	48.13	50.51

3.2 响应预测模型的建立

得到响应值的结果后，通过多元回归方程建立响应预测模型。二阶响应预测模型不仅考虑了单因素及其二次效应和交互效应对响应值的影响，在处理多变量问题上还具有较高的效率，足以满足表6中设置的4个影响因子。得到T_1、T_2、T_3的响应预测模型如下：

$$\begin{aligned}T_1 = {} & 44.73+0.71\theta+11.86a_p+0.9v_f-1.23v_r \\ & +1.67\theta a_p+0.13\theta v_f-0.1\theta v_r+0.4a_pv_f-0.6a_pv_r \\ & -0.005896v_fv_r-0.032\theta^2+1.29a_p{}^2-0.72v_f{}^2+0.79v_r{}^2\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}T_2 = {} & 45.07+0.026\theta+12.98a_p+0.66v_f-1.18v_r \\ & +0.53\theta a_p+0.79\theta v_f+0.19\theta v_r-0.41a_pv_f-0.68a_pv_r \\ & +0.1v_fv_r+0.51\theta^2+2.24a_p{}^2+0.48v_f{}^2+1.42v_r{}^2\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}T_3 = {} & 47.84-1.59\theta+13.82a_p+4.25v_f,-1.05v_r \\ & +0.44\theta a_p+3.54\theta v_f,+0.16\theta v_r+0.54a_pv_f,-0.35a_pv_r \\ & +0.32v_fv_r+0.28\theta^2+2.66a_p{}^2-3.97v_f{}^2-0.043v_r{}^2\end{aligned} \tag{10}$$

式中：T_1、T_2、T_3分别为Sp1、Sp2、Sp3在铣削过程中的最高温度；θ为铣削角度；a_p为铣削深度；v_f为进给速度；v_r为冲洗液流速。

如表8所示为响应预测模型T_1的评估结果。通过相关系数R^2、校正决定系数$Adj\ R^2$、预测决定系数$Pre\ R^2$、失拟项$C.V.\%$等来评估多元回归模型的质量和总体预测能力。$Adj\ R^2$是对R^2进行调整后的指标，它根据模型中自变量的个数和样本大小对模型进行调整来避免过拟合。$Pre\ R^2$用来评估模型对于新数据的预测能力，其值应该接近$Adj\ R^2$。如果两者差异较大，表明模型可能存在过拟合。$Adeq$精度是测量信噪比的指标。因此，一个可靠的模型其相关系数R^2需大于0.8，预测相关系数$Pre\ R^2$与校正相关系数$Adj\ R^2$之差需小于0.2，失拟项$C.V.\%$需小于10, $Adeq$精度需大于4。由表8可知，模型的相关系数R^2为0.9975，且校正决定系数$Adj\ R^2$和预测决定系数$Pre\ R^2$之差为0.0096，说明了模型的准确性。同时失拟项$C.V.\%$为1.25，$Adeq$精度为67.887，说明了仿真实验数据的可靠性。如表9所示为T_1的方差分析结果，F值为396.94，P值小于0.0001，表示其具有显著性。

表 8 模型 T_1 的评估结果

Table 8 Evaluation results of model T_1

标准差	0.57	$AdjR^2$	0.9950
$C.V.\%$	1.25	$Pre\ R^2$	0.9854
R^2	0.9975	$Adeq$ 精度	67.887

表 9 模型 T_1 的方差分析

Table 9 Analysis of variance for model T_1

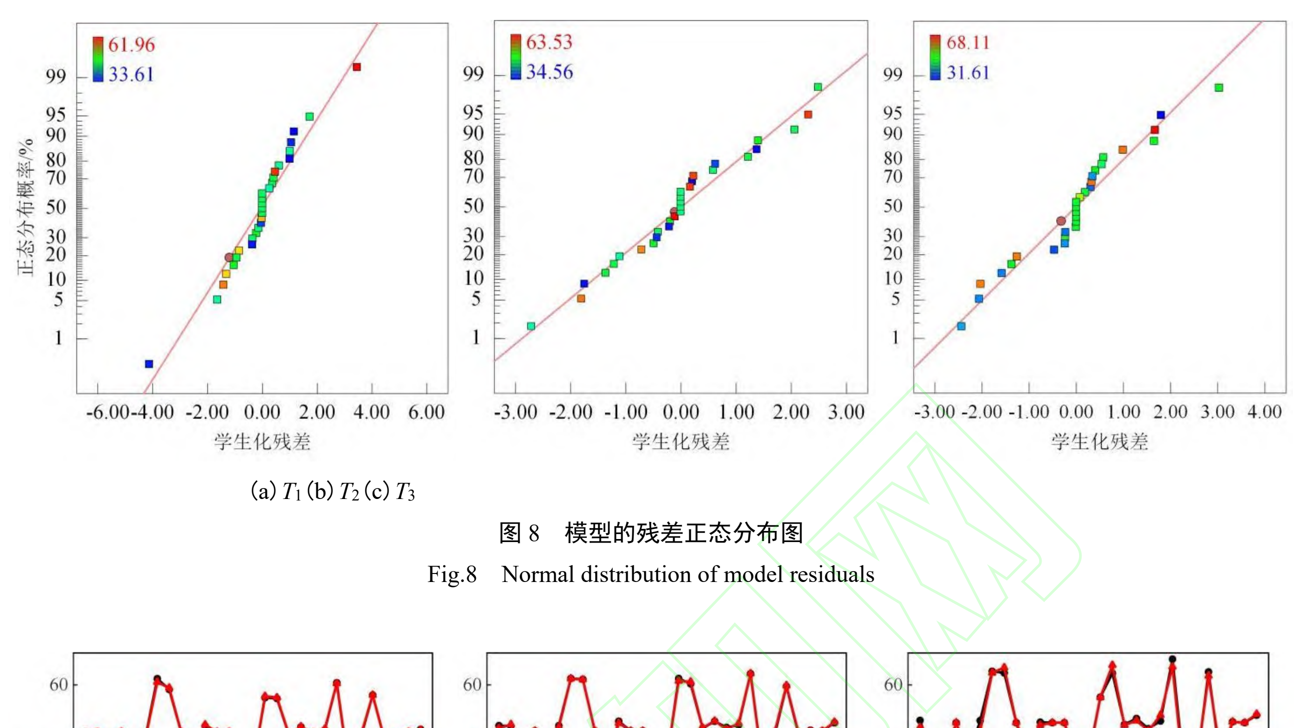
方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	P 值
模型	1787.00	14	127.64	396.94	<1e-4
θ	5.50	1	5.50	17.10	1e-3
a_p	1515.61	1	1515.61	4713.15	<1e-4
v_f	8.77	1	8.77	27.28	1e-4
v_r	18.08	1	18.08	56.23	<1e-4
$\theta 1e_p$	11.16	1	11.16	34.69	<1e-4
$\theta 1e_f$	0.073	1	0.073	0.23	0.64
$\theta.v_r$	0.046	1	0.046	0.14	0.7120
$a_p v_f$	0.63	1	0.63	1.97	0.1827
$a_p v_r$	1.53	1	1.53	4.75	0.0469
v_fv_r	1.474 e-4	1	1.474 e-4	4.584 e-4	0.9832
θ^2	6.505 e-3	1	6.505 e-3	0.020	0.8889
$a_p{}^2$	10.79	1	10.79	33.55	<1e-4
$v_f{}^2$	3.38	1	3.38	10.51	0.0059
$v_r{}^2$	3.17	1	3.17	9.84	0.0073
残差	4.50	14	0.32		
失拟项	4.50	10	0.45		

如图8（a）、（b）、（c）所示分别为模型T_1、T_2、T_3的残差正态分布图，它们的残差值在直线上呈正态分布趋势，说明模型满足正态性要求，具有较好的适应性。如图9（a）、（b）、（c）所示分别为模型T_1、T_2、T_3的预测值与仿真实验值的关系。T_1、T_2、T_3的预测值与仿真实验值随着实验序号呈现出了一致的变化规律。三个模型预测值的最大残差分别为0.27℃、0.31℃、1.06℃，且无固定变化规律，说明模型满足方差齐性和独立性要求，具有较好的预测精度。

3.3 影响因子的敏感性分析

由表9可知，各影响因子的显著性水平由大至小依次为：铣削深度a_p>冲洗液流速v_r>进给速度v_f>铣削角度θ。其中铣削深度a_p的F值远大于其他影响因子，说明了铣削深度对最高铣削温度的影响剧烈。

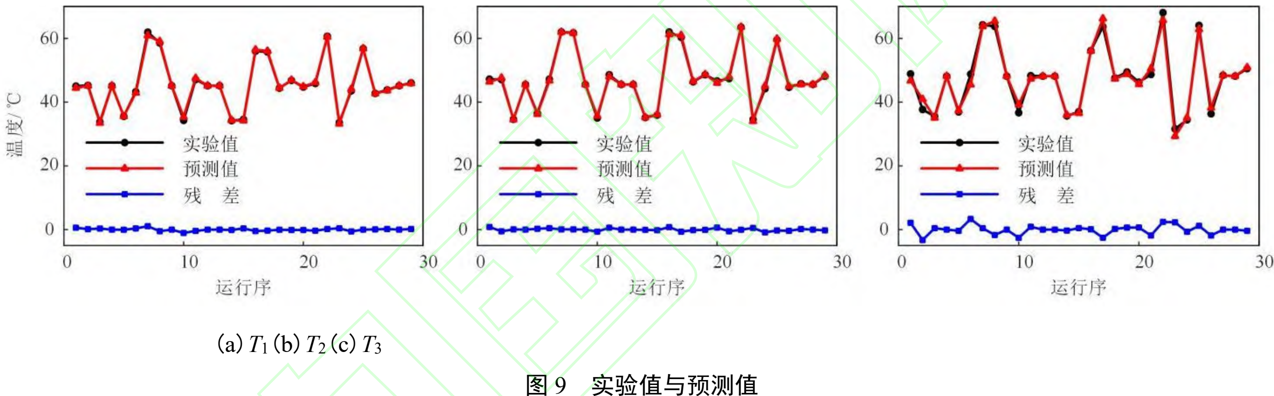
DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123



(a) T_1 (b) T_2 (c) T_3

图 8　模型的残差正态分布图

Fig.8　Normal distribution of model residuals



(a) T_1 (b) T_2 (c) T_3

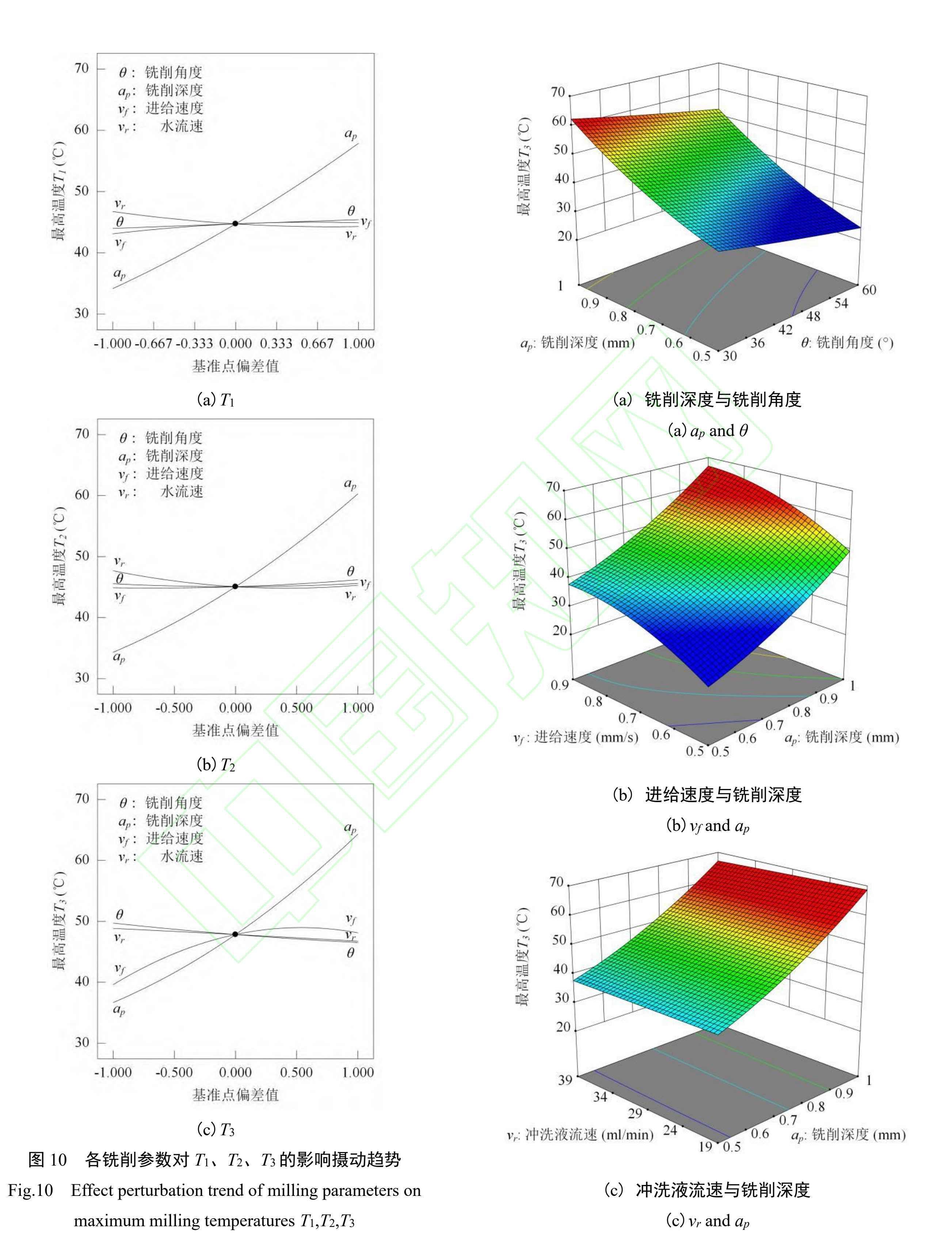
图 9　实验值与预测值

Fig.9　Experimental and predicted values

如图10（a）、（b）、（c）所示分别为铣削角度θ、铣削深度a_p、进给速度v_f以及冲洗液流速v_r对最高铣削温度T_1、T_2、T_3的影响摄动趋势图。铣削深度a_p与最高铣削温度之间呈明显正相关趋势，冲洗液流速v_r呈负相关趋势。当铣削深度a_p增大时，铣刀与骨材料之间的摩擦加剧而产生更多的摩擦热，因此铣削温度越高。冲洗液流速v_r越快，与骨材料之间交换的热量越多，因此铣削温度越低。铣削角度θ的变化影响的是刀具的刀刃与骨材料之间的铣削力。通常较大的铣削力也对应着较高的铣削温度[22]。本研究中铣削角度θ的变化范围为30°、45°、60°，角度之间的变化较小，映射在铣削力上的变化较小。因此可以看出图10中铣削角度θ对最高铣削温度产生的影响也较小。如图10(c)所示，进给速度v_f与最高铣削温度之间具有明显的非线性关系。在一方面，进给速度v_f越快，铣刀的每齿进给量越多，使得产生的摩擦热越多，因此铣削温度升高。另一方面，进给速度v_f越快，导致热源停留的时间越短，热量的传导越少，因此铣削温度越低。这些相互竞争的影响使得进给速度v_f对铣削温度的影响是非线性的。除此之外，温度采样点的位置也起着关键作用。如果采样点位于离骨与刀接触区域很近的位置，则测量温度会随着进给速度的增大而升高。而如果采样点位于刚铣削过的骨的表面，或者离热源距离较远时，则测量温度会随着进给速度的增大而降低[2]。有文献指出最高铣削温度会随着进给速度的增大而降低[8]。相反，也有文献得出了增加进给速度会提高铣削温度的结论[9]。如上所述，考虑到影响发热的各种因素，这些矛盾的结论都是合理的。

如图11（a）、（b）、（c）所示分别为影响因子铣削深度a_p、铣削角度θ、进给速度v_f以及冲洗液流速v_r的交互效应对最高铣削温度T_3的响应曲面图。等高线图为响应曲面图的投影，响应曲面图坡度越陡，等高线

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123



(a) T_1

(b) T_2

(c) T_3

图 10　各铣削参数对 T_1、T_2、T_3 的影响摄动趋势

Fig.10　Effect perturbation trend of milling parameters on maximum milling temperatures T_1,T_2,T_3

(a)　铣削深度与铣削角度

(a) a_p and θ

(b)　进给速度与铣削深度

(b) v_f and a_p

(c)　冲洗液流速与铣削深度

(c) v_r and a_p

图 11　影响因子交互效应对 T_3 的响应曲面图

Fig.11　Response surface diagram of the influence factor to the maximum milling temperature T_3

越弯曲则表明交互效应越显著。如图11(b)所示，通过对比可以看出进给速度与铣削深度的组合对最高铣削温度的影响最显著。而如图11(c)所示，由于冲洗液流

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

速与铣削深度对铣削温度有着相反且线性的影响, 其组合的等高线几乎为直线。但需要注意的是本研究仅讨论各影响因子在实验范围内对最高铣削温度的影响。铣削参数的范围、是否使用冲洗液、骨材料的种类以及刀具形状不同时，可能会得出不同的结论。

3.4 优化设计

在进行机器人辅助骨铣削手术时，通常会利用各种传感器对骨铣削状态进行监测和反馈，控制铣刀的运动使得铣削深度保持在一个稳定且安全的范围内，避免铣刀伤害患者的神经、血管以及其他软组织。因此，当铣削深度被控制在某一目标的前提下，该如何选择其它铣削参数来尽量减少骨铣削手术中热坏死的发生。针对这一情况，各铣削参数的约束条件被设置如下：

$$\begin{cases} a_p = 0.8\text{mm} \\ 30° \le \theta \le 60° \\ 0.5\text{mm/s} \le v_f \le 0.9\text{mm/s} \\ 31.6\ \mu\text{m}^3/\text{s} \le v_r \le 65\ \mu\text{m}^3/\text{s} \\ T_1, T_2, T_3 \le 50℃ \end{cases} \tag{11}$$

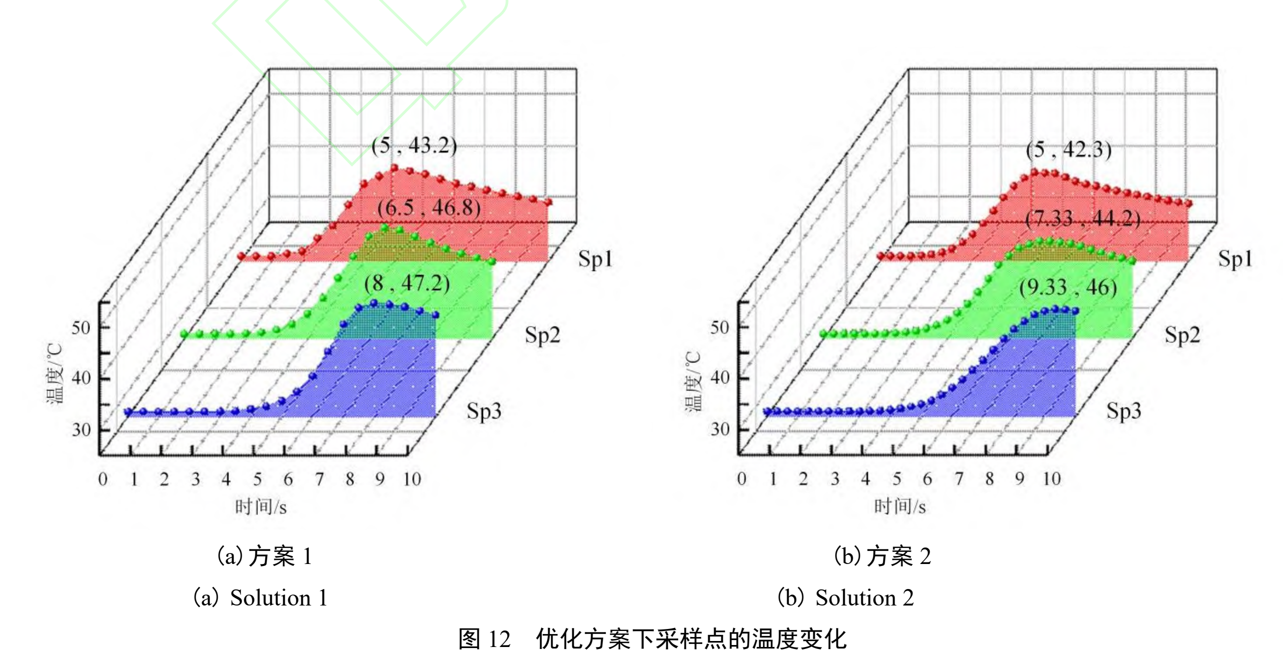
目前学术上普遍将47℃作用1min定义为人骨热坏死的阈值，将50℃定义为人骨能够维持生物活性而不发生热坏死的极限[18]。因此将优化目标设置为T_1、T_2、T_3小于50℃。在手术过程中，进行一次骨铣削操作时，铣削深度通常不会超过1mm。因此在约束条件中将铣削深度a_p控制在0.8 mm。本研究只标定了冲洗液流速为31.6 μm³/s、43.3 μm³/s以及65 μm³/s时的对流换热系数。当冲洗液流速为31.6 μm³/s时，冲洗液带走的热量不足以使T_1、T_2、T_3小于50℃。因此, 根据以上约束条件和建立的响应预测模型，最后得到了优化设计方案如表10所示。

表 10 优化方案

Table 10 Optimization solution

方案	铣削深度（mm）	铣削角度（°）	进给速度（mm/s）	冲洗液流速（μm³/s）
方案 1	0.8	48	0.63	43.3
方案 2	0.8	47	0.58	65

为了验证优化方案的有效性，根据表10中的铣削参数设置分别进行仿真。骨工件的初始温度设为26℃，球头铣刀的转速设为30000 r/min，铣削时间为10s。如图12（a）、（b）所示分别方案1、2下采样点的温度变化，在两组优化方案下采样点的最高温度均没有超过50℃，说明了该优化方案的有效性。但值得注意的是, 式(8)、(9)、(10)是基于骨上三个采样点Sp1、Sp2、Sp3的温度数据所建立的响应预测模型，但该三个采样点的温度变化并不能代表整个骨工件在铣削过程中的温度变化。其中方案2的仿真结果如图13所示，左图是在铣削结束那一刻骨铣削温度模型俯视图的温度场，右图是距离骨面0.5 mm处横截面的温度场。由图13可以看出，骨铣削温度云图呈彗星形。在模型中将50℃设置为温度显示上限，可以看出球头铣刀的温度以及



(a) 方案 1

(a) Solution 1

(b) 方案 2

(b) Solution 2

图 12 优化方案下采样点的温度变化

Fig.12 Temperature changes at the sample points with optimization solutions

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

骨上留下的铣削痕迹的温度都明显大于50℃。所以优化设计方案的有效性是有限的。本文建立的骨铣削温度模型还存在以下几点局限之处。一是模型中没有考虑骨的曲率，而是将其理想化为一块规则的矩形块。这是由于手术中的骨铣削区域狭小，可以将其等效为平面，同时考虑骨的曲率会大大增加建模难度和仿真计算时间。二是没有考虑骨的热各向异性和不均匀性。这是由于皮质骨的热学特性在不同方向上的变化较小[18]，同时目前还无法获取皮质骨准确的热各向异性参数。该骨铣削温度模型能够预测在不同铣削条件下的温度场，直观展示铣刀以及骨的温度变化，提供最高温度以及其出现的位置、时间等丰富信息。有望能够为医生在术前规划中选择以及术中调整铣削参数提供参考。

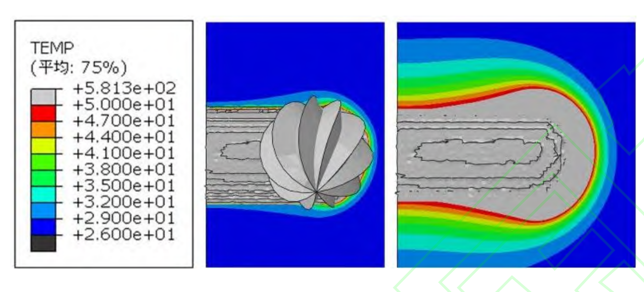


图13　方案2的骨铣削温度场

Fig.13　Bone milling temperature field for solution 2

4　结论

(1) 本文提出了一种标定冲洗液对流换热系数的方法。根据点热源温度场理论，进行了三组点热源实验并建立了有限元模型仿真实验过程，冲洗液流速分别为31.6 μm³/s、43.3 μm³/s和65 μm³/s。标定结果表明在三组流速下，冲洗液的对流换热系数分别为400 W/（m²·℃）、800 W（/m²·℃）和1100 W/（m²·℃）。

(2) 基于有限元法建立了球头铣刀铣削皮质骨的温度模型。该模型考虑了冲洗液对骨铣削温度的影响，能够获得在不同铣削参数下包括主轴转速、铣削角度、进给速度、铣削深度以及冲洗液流速的温度场。

(3) 基于响应面法建立了最高铣削温度的响应预测模型，分析了各铣削参数对最高铣削温度的影响。分析结果说明铣削深度对最高铣削温度的影响最大，其次分别是冲洗液流速、进给速度和铣削角度。为了控制最高铣削温度不超过50℃，优化了铣削参数并进行了仿真验证。仿真结果中采样点中最高温度分别为47.2℃和46℃，实现了优化目标。

参考文献

[1] GINOYA T, MADDAHI Y, ZAREINIA K. A historical review of medical robotic platforms[J]. Journal of Robotics, 2021, 2021: 1-13.

[2] AL-ABDULLAH K I A-L，ABDI H，LIM C P，et al. Force and temperature modelling of bone milling using artificial neural networks[J]. Measurement， 2018， 116: 25-37.

[3] CALTTENBURG R，COHEN J，CONNER S，et al. Thermal properties of cancellous bone[J]. Journal of biomedical materials research， 1975， 9(2): 169-182.

[4] 孙健文，王瑞，夏光明，等. 基于双耳麦克风实现机器人骨铣削状态自动控制[J]. 仪器仪表学报，2024，45(01): 259-268.
SUN J W, WANG R, XIA G M, et al. Automatic control of bone milling state based on robot with binaural microphones[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2024， 45(01)： 259-268.

[5] 夏光明，代煜，张建勋. 基于声信号的骨科机器人椎板铣削深度控制[J]. 仪器仪表学报， 2021， 42(2): 144-154.
XIA G M, DAI Y, ZHANG J X. Milling depth control of lamina for orthopedic robot based on acoustic signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument， 2021， 42(2)： 144-154.

[6] 李睿，代煜，张建勋，等. 融合五自由度位姿信息的单目内窥镜目标尺寸测量[J]. 仪器仪表学报，2022，43(6): 230-238.
LI R, DAI Y, ZHANG J X, et al. Object dimension measurement using the 5-dof electromagnetic tracked endoscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2022， 43(6)： 230-238.

[7] LI Q， DU Z， YU H. Temperature estimation for robotic bone milling surgery based on heat generation and conduction[J]. Measurement， 2021，DOI: 10.1016 / j. measurement.2021.109411.

[8] SHIN H， YOON Y-S. Bone temperature estimation during orthopedic round bur milling operations[J]. Journal of biomechanics， 2006， 39(1): 33-39.

[9] SUGITA N， OSA T， MITSUISHI M. Analysis and estimation of cutting-temperature distribution during end milling in relation to orthopedic surgery[J]. Medical engineering & physics， 2009， 31(1): 101-107.

[10] LIAO Z， AXINTE D A. On chip formation mechanism

DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

in orthogonal cutting of bone[J]. International journal of machine tools and manufacture， 2016， 102: 41-55.

[11] 杨兆欣，顾正华，张文清，等. 基于热电偶的低速风洞气流温度误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报，2022，43(5): 68-76.
YANG Z X, GU Z H, ZHANG W, et al. The error compensation method of the low-speed wind tunnel flow temperature based on the thermocouple[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument， 2022， 43(5)： 68-76.

[12] 徐伟，曹玉岩，郝亮，等. 复合材料机翼试验-数值建模方法及气弹分析[J]. 仪器仪表学报， 2019，40(10): 237-246.
XU W, CAO Y Y, HAO L, et al. Combined experiment and numerical modeling approach for the composite material wing and aeroelastic analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument， 2019， 40(10)： 237-246.

[13] TIAN H， PAN J， GAO Y，et al. Prediction Modeling and Sensitivity Analysis of Robot Bone Milling Temperature Operated by a Doctor[J]. Mathematical Problems in Engineering， 2021， 2021: 1-17.

[14] 王志超，张志杰，张秋宁.一种基于 FPGA 的瞬态温度采集系统设计[J]. 电子测量技术，2023，46(19): 49-55.
WANG Z C, ZHANG Z J, ZHANG Q N. Contact temperature measurement system based on FPGA[J]. Electronic measurement technology, 2023, 46(19): 49-55.

[15] 郭淼，曹雪，李越，等. 空间细胞培养装置设计与流体动力学仿真优化[J]. 仪器仪表学报， 2023，44(10): 60-70.
GUO M, CAO X, LI Y, et al. Design of space cell culture device and optimization using fluid dynamics simulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument， 2023， 44(10)： 60-70.

[16] TAI B L， ZHANG L， WANG A，et al. Neurosurgical bone grinding temperature monitoring[J]. Procedia Cirp， 2013， 5: 226-230.

[17] ZHANG L， TAI B L， WANG G，et al. Thermal model to investigate the temperature in bone grinding for skull base neurosurgery[J]. Medical engineering & physics， 2013， 35(10): 1391-1398.

[18] CHEN Q S， LIU Y， DONG Q-S. Modeling and experimental validation on temperature diffusion mechanism in high-speed bone milling[J]. Journal of Materials Processing Technology， 2020，DOI: 10.1016 / j. jmatprotec.2020.116810.

[19] JIANG W， LIU Z. Simulation Study on the Influence of Drilling Parameters on the Temperature of Skull Drilling[C]. IEEE International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT), 2021, DOI: 10.1109 / ICEEMT52412.2021.9602745.

[20] YI W， XIANG Y， KAI Z，et al. Example of analytical solution of welding temperature field for infinite plate[J]. Journal of Lanzhou University of Technology， 2022， 48(3): 13-16.

[21] ZDERO R， BRZOZOWSKI P， SCHEMITSCH E H. Biomechanical properties of artificial bones made by Sawbones: A review[J]. Medical Engineering & Physics， 2023， : 104017.

[22] SANTIUSTE C，RODRíGUEZ-MILLáN M， GINER E， et al. The influence of anisotropy in numerical modeling of orthogonal cutting of cortical bone[J]. Composite Structures， 2014， 116: 423-431.

作者简介



周紫琪，2022年于华东交通大学获得学士学位，现为南开大学硕士研究生，主要研究方向为骨科机器人的温度感知与温度控制。
E-mail:zhouziqi1@mail.nankai.edu.cn

Zhou Ziqi received her B.Sc. degree from East China Jiaotong University in 2022. She is currently a master student at Nankai University. Her main research interests include temperature perception and temperature control of orthopedic robots.



柯玮翔，2023年于江西理工大学获得学士学位，现为南开大学硕士研究生，主要研究方向为医疗机器人、边缘计算和信号处理。
E-mail:keiweixiang@mail.nankai.edu.cn

KeWeixiang received his B.Sc. degree from Jiangxi University of Science and Technology in 2023. He is currently a master student at Nankai University. His main research interests include medical robots, edge computing, and signal processing.

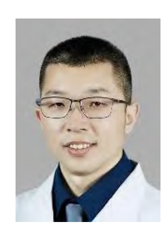


胡钧飞，2022年于南京工程学院获得学士学位，现为南开大学硕士研究生

Chinese Journal of Scientific Instrument
DOI: 10. 19650 / j. cnki. cjsi. J2413123

，主要研究方向为骨科机器人的主从控制和力反馈技术。
E-mail:hujunfei@mail.nankai.edu.cn

HuJunfei received his B.Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2022. He is currently a master student at Nankai University. His research interests include orthopedic robot master-slave control and force feedback technique.



赵志辉，2005年于河北医科大学获得学士学位，2016于天津医科大学获得硕士学位，2021于天津医科大学获得博士学位，现为天津医科大学附属第四中心医院，副主任医师，主要研究方向为剪切应力促进骨折的愈合机制研究，股骨头坏死机制研究。
E-mail: zhaozhihui0929@126.com

Zhao Zhihui received his B.Sc. degree from Hebei Medical University in 2005, andreceived his M.Sc. and Ph.D. degreesboth from Tianjin Medical Universityin 2016 and 2021, respectively. He is currently an associate chief physician at the Fourth Central Hospital Affiliated to Tianjin Medical University. His main research interests include the study of healing mechanism of shear stress-promoted fractures and the study of femoral head necrosis mechanism.



代煜（通信作者），在2002、2004年和2009年于哈尔滨工业大学获得学士学位，硕士学位和博士学位。现为南开大学教授，主要研究方向为面向手术机器人的智能感知技术。
E-mail:daiyu@nankai.edu.cn

Dai Yu（Corresponding author）received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 2002, 2004, and 2009, respectively. He is currently a professor at Nankai University. His main research interest is intelligent technology for surgical robot.